



Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine

105-4 | 2017
Varia 2017

Cartographie régionale de la susceptibilité aux laves torrentielles dans les Alpes du Sud

Mélanie Bertrand, Frédéric Liébault et Hervé Piégay



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/rga/3530>

DOI : 10.4000/rga.3530

ISSN : 1760-7426

Éditeur

Association pour la diffusion de la recherche alpine

Référence électronique

Mélanie Bertrand, Frédéric Liébault et Hervé Piégay, « Cartographie régionale de la susceptibilité aux laves torrentielles dans les Alpes du Sud », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 105-4 | 2017, mis en ligne le 13 janvier 2017, consulté le 02 mai 2019. URL : <http://journals.openedition.org/rga/3530> ; DOI : 10.4000/rga.3530

Ce document a été généré automatiquement le 2 mai 2019.



La *Revue de Géographie Alpine* est mise à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Cartographie régionale de la susceptibilité aux laves torrentielles dans les Alpes du Sud

Mélanie Bertrand, Frédéric Liébault et Hervé Piégay

Ce travail a bénéficié d'un financement par le projet RhyTMME (CPER PACA). Les auteurs remercient particulièrement Patrice Mériaux et Catherine Fouchier, porteurs de ce projet. Les auteurs tiennent à remercier également le Conseil Général des Alpes Maritimes pour la mise à disposition des orthophotographies sur ce département. Enfin, ce travail a bénéficié de la relecture de deux évaluateurs anonymes que les auteurs souhaitent également remercier.

Introduction

- 1 La problématique des aléas naturels dans les territoires de montagne est à l'origine de nombreuses études visant à mieux comprendre et prédire les conditions d'occurrence, l'intensité et les effets des phénomènes naturels générateurs de risques. L'intégration des avancées de la recherche dans ce domaine – en particulier les approches abordant l'évaluation des aléas à l'échelle régionale – au sein des analyses de risques est cruciale pour l'amélioration de leur gestion, aussi bien à long terme (aménagement durable du territoire, gestion préventive) qu'à très court terme (gestion de crise).
- 2 L'aléa « laves torrentielles » est reconnu comme l'un des plus destructeurs en montagne (Jakob et Hungr, 2005), générant de nombreux dégâts, et provoquant parfois même des victimes, comme ce fut le cas lors de la catastrophe de Biescas dans les Pyrénées espagnoles, en août 1996 (Lajournade *et al.*, 1998). Une lave torrentielle peut être définie comme un mouvement de terrain rapide, constitué d'un mélange d'eau, de débris organiques et de sédiments de toutes tailles, qui se produit généralement sous forme de bouffées, avec une concentration solide supérieure à 50 % (Coussot et Meunier, 1997 ; Chambon et Laigle, 2013 ; Liébault *et al.*, 2013). Elles peuvent être de type granulaire ou cohésif en fonction de la granulométrie de la phase solide (Bonnet-Staub, 1998 ; Remaître *et al.*, 2005). Des efforts importants ont été engagés depuis plusieurs années pour prédire à

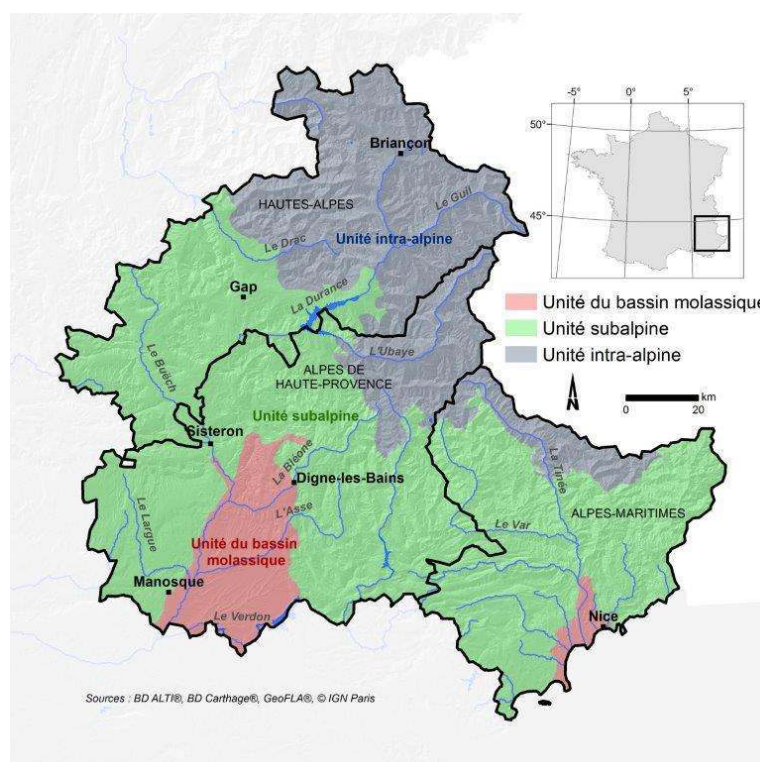
l'échelle locale l'étalement des laves sur les cônes de déjection à partir de modèles à bases physiques (Laigle *et al.*, 2006 ; Toyos *et al.*, 2007). Néanmoins, ces approches locales ne sont pas transposables aux échelles régionales et le développement de méthodes adaptées à la caractérisation des phénomènes torrentiels sur de grandes emprises spatiales reste encore rare (Horton *et al.*, 2008 ; Miller et Burnett, 2008 ; Kappes *et al.*, 2011). Ces approches aux macro-échelles doivent relever aussi bien de (i) l'analyse des conditions prédisposant à l'activité de laves torrentielles (analyse de susceptibilité prenant en compte la disponibilité sédimentaire dans le bassin versant et dans le chenal, ainsi que la pente et les caractéristiques morphométriques du bassin versant), mais également, (ii) des conditions hydrométéorologiques permettant le déclenchement des coulées (Wieczorek et Glade, 2005). Ainsi, une connaissance régionalisée de la susceptibilité aux laves torrentielles est indispensable pour l'identification rapide des sites sensibles aux événements pluviométriques de forte intensité et la planification de stratégies régionales de gestion du risque.

- 3 Les bassins torrentiels susceptibles de déclencher des crues ou laves torrentielles sont, pour la plupart, connus des services de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) dans les secteurs à forte vulnérabilité. La base de données RTM (<http://rtm-onf.ifn.fr/>), disponible pour tous les massifs alpins français, archive pour le territoire des Alpes du Sud près de 30 000 événements (tous types confondus) survenus depuis plusieurs siècles, et est régulièrement mise à jour par les services RTM. Elle recense les impacts de l'activité torrentielle, mais la nature des processus en jeu n'est pas toujours identifiée de manière certaine (laves ou crues). L'identification des processus et la prédiction de leur intensité à l'échelle régionale ne sont donc pas envisageables uniquement à partir de cette connaissance partielle de l'aléa. La production de jeux de données à l'échelle régionale et le développement des méthodologies pour les constituer sont donc encore des enjeux de recherche importants.
- 4 Dans ce contexte, l'objectif a donc été de produire une méthodologie de restitution spatiale de la susceptibilité torrentielle à une échelle régionale (c'est-à-dire l'évaluation du potentiel de son occurrence spatiale, et non pas l'étude physique du phénomène de lave torrentielle en tant que tel) et de l'appliquer dans les Alpes du Sud. Des méthodes géomatiques et statistiques ont été mises en œuvre. Ce choix méthodologique s'explique par le fait qu'à large échelle, il est impossible de contraindre les variables d'entrée nécessaires à l'application des approches mécanistes conduites aux échelles locales. Il en résulte une carte statique qui caractérise la susceptibilité des petits bassins versants de montagne aux phénomènes de lave torrentielle, qui ne qualifie ni le volume ni la propagation 2D des écoulements.
- 5 Les développements méthodologiques présentés dans cet article visent à distinguer, au sein du réseau hydrographique, les types d'écoulement torrentiel dominants (laves torrentielles et charriage). Cette approche repose sur l'intégration de différents facteurs de prédisposition aux laves torrentielles (Bonnet-Staub, 1998), en particulier (i) les caractéristiques morphométriques des tronçons et de leur bassin versant et (ii) leur potentiel de fourniture sédimentaire. Pour chacun de ces facteurs, les développements méthodologiques ont été spécifiques et sont détaillés dans la section méthodologique.

Terrain d'étude

- 6 La zone étudiée (Figure 1) s'étend entre 43°28'N et 45°08'N de latitude et 5°30'E et 7°42'E de longitude. Elle recouvre presque entièrement les Alpes françaises méridionales et inclut une partie du littoral méditerranéen. Le travail de cartographie a été effectué sur l'intégralité des trois départements alpins de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, à savoir les Hautes-Alpes (05), les Alpes-de-Haute-Provence (04) et les Alpes-Maritimes (06), représentant une emprise spatiale d'environ 16 900 km².

Figure 1. Terrain d'étude et son découpage en grandes unités géologiques



- 7 Ce territoire recouvre trois grandes unités géologiques : (1) la zone intra-alpine, (2) la zone subalpine, et (3) le piémont molassique. Dans la zone intra-alpine se trouvent les massifs les plus élevés (jusqu'à environ 4100 m dans le Massif des Écrins), avec l'affleurement du socle rocheux des massifs cristallins externes (Paléozoïque), des roches métamorphiques et des secteurs étendus de roches sédimentaires. Le modelé de cette zone alpine a été très affecté par la présence de glaciers (encore présents dans les Écrins) lors des périodes froides du Quaternaire.
- 8 L'unité subalpine est moins élevée puisque les altitudes maximales sont inférieures à 2000 m, sauf localement dans le massif du Dévoluy et dans la haute vallée de la Bléone. Les secteurs les plus élevés ont également été englacés au Würm (Haute Bléone, Haut Verdon et Drac), mais les héritages glaciaires (dépôts morainiques) sont moins marqués que dans la zone intra-alpine. Cette unité est constituée exclusivement de roches sédimentaires, faites principalement d'alternances de calcaires et de marnes. C'est ici qu'on retrouve notamment les Terres Noires (marnes callovo-oxfordiennes), des formations très sensibles à l'érosion qui affleurent sur une surface importante du

domaine subalpin des Alpes du Sud, notamment dans le bassin versant de la Durance (100 000 ha) (Mathys *et al.* 1996).

- 9 La troisième unité, la plus basse (inférieure à 1000 m), correspond au domaine molassique, composé de conglomérats, de poudingues, de grès, voire dans les Alpes-Maritimes de dépôts marins (sables de Fontainebleau ou Pliocène du pourtour méditerranéen).
- 10 Le linéaire de réseau hydrographique pour lequel la susceptibilité aux laves torrentielles est caractérisée est de ~19000 km, ce qui correspond au réseau pour lequel la surface drainée est inférieure à 40 km². Ce critère de taille correspond au plus grand bassin versant connu pour produire des laves dans les Alpes françaises (le Boscodon, sur les rives du Lac de Serre-Ponçon).

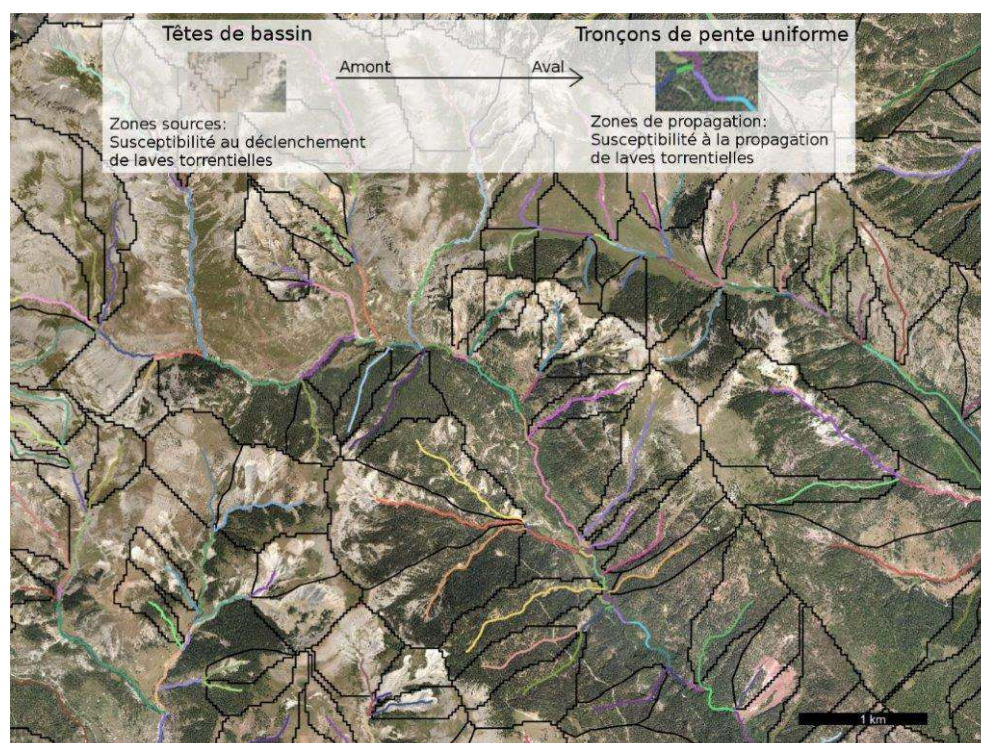
Carte de susceptibilité aux laves torrentielles : approche méthodologique

- 11 Reposant sur des unités spatiales définies ci-après, la carte de susceptibilité aux laves torrentielles intègre deux facteurs de prédisposition : (1) les propriétés morphométriques des torrents et de leur bassin versant qui permettent d'évaluer l'énergie gravitaire disponible pour déclencher et propager des laves et (2) la fourniture sédimentaire des bassins amont qui contrôle le déclenchement des laves torrentielles et permet, une fois croisée avec les caractéristiques morphométriques, d'évaluer la probabilité morpho-sédimentaire d'occurrence des laves torrentielles.

Identification des unités spatiales

- 12 Cette analyse repose sur deux types d'unités spatiales préalablement définies, les têtes de bassin qui fournissent les matériaux et les tronçons présentant une pente uniforme qui les transfèrent vers l'aval (Figure 2). Les bassins de tête (correspondant aux tronçons de rangs 1 et 2) sont considérés comme des zones sources pour lesquelles la capacité à fournir des matériaux et l'énergie disponible pour le déclenchement de laves torrentielles sont évalués. Ils ont été délimités à partir d'une analyse hydrologique effectuée sur un MNT à 25 m (BD TOPO®) sous ArcGIS™ (extension ArcHydro© Tools). La limite inférieure de surface drainée des têtes de bassin correspond à la plus petite ravine représentée dans le réseau hydrographique de la BD TOPO.

Figure 2. Définition des unités spatiales



- 13 Le linéaire torrentiel est également découpé en tronçons présentant des pentes uniformes afin de pouvoir évaluer tronçon par tronçon l'énergie disponible pour la propagation de laves torrentielles. Ils ont été définis après réaggrégation de segments unitaires de 50 m fondée sur la détection statistique des ruptures dans la série longitudinale des pentes.
- 14 Ce découpage en unités fonctionnelles repose sur une simplification de la cascade sédimentaire propre aux laves torrentielles, qui ne peut être résolue à l'échelle régionale. De nombreuses études de cas ont montré en effet que les chenaux torrentiels situés en aval du bassin de réception constituent souvent des sources sédimentaires importantes, du fait de l'érosion du lit par les laves (Remaître *et al.*, 2002 ; Theule *et al.*, 2012). La prise en compte de ces processus à l'échelle régionale implique le développement d'outils de reconnaissance automatique des stocks de sédiments meubles dans les chenaux, non disponibles à ce jour.

Modèle statistique de discrimination des réponses torrentielles

- 15 Un modèle statistique a été défini pour discriminer des réponses torrentielles en fonction du type d'écoulement dominant observé à l'exutoire (laves torrentielles ou crues à charriage). L'indice de Melton (ou dénivelé spécifique, *et al.*, 1987 ; Kostaschuk) et la pente du cône de déjection sont fréquemment utilisés pour identifier les torrents à laves (e.g. Jackson *et al.*, 1987 ; Kostaschuk *et al.*, 1986 ; Marchi *et al.*, 1993 ; Marchi et Brochot, 2000). Le fait que ces travaux aboutissent à des conclusions similaires dans des zones géographiques distinctes (Alpes françaises, italiennes, suisses, autrichiennes, chaînes côtières de Colombie Britannique, Nouvelle Zélande, Pyrénées) confirme que ces

indicateurs morphométriques sont assez robustes et généralisables, ce qui permet de les utiliser en matière de prédiction des réponses torrentielles.

Équation 1. Indice de Melton

$$R = \frac{Z_{max} - Z_{min}}{A^{0.5}}$$

Avec R , l'indice de Melton, Z_{max} et Z_{min} l'altitude maximale et celle de l'exutoire du bassin, et A la surface drainée en km^2

- 16 En s'appuyant sur ces travaux, nous avons construit un modèle de régression logistique basé sur des données publiées issues de 620 bassins. Ce modèle fournit ainsi une loi de probabilité de l'activité de laves torrentielles en fonction de la pente d'un tronçon et de l'indice de Melton de son bassin amont. La sensibilité et la spécificité, représentant la capacité à bien prédire respectivement les cas de laves et les cas de non-lave (des bassins à charriage uniquement) en minimisant dans les deux cas le mauvais classement des individus ont été calculées afin d'évaluer la performance de ce modèle (Begueria, 2006). En considérant que les individus présentant une activité de laves torrentielles sont ceux dont le modèle prédit une probabilité supérieure à 0.5, on obtient des indicateurs de sensibilité et de spécificité évalués à 0.95 et 0.75 respectivement. L'ensemble de la démarche statistique est décrit dans Bertrand *et al.* (2013).

Cartographie automatisée de l'érosion

- 17 Les zones en érosion représentent les terrains susceptibles d'alimenter en sédiments le réseau hydrographique ; il s'agit donc d'un facteur de prédisposition majeur pour le déclenchement de laves torrentielles (Bonnet-Staub, 1998), dont les impacts se répercutent bien en aval des zones d'entrée (Cenderelli et Kite, 1998). Aux échelles régionales, une évaluation des volumes de sédiments disponibles n'est cependant pas envisageable avec les méthodes de terrain que l'on met en œuvre habituellement dans le cas de petits bassins versants. Afin de réduire le temps d'acquisition, nous avons donc choisi d'utiliser des méthodes de télédétection en s'appuyant sur des jeux de données disponibles à large échelle, en particulier des orthophotographies infrarouges (831 dalles, résolution 0.5 m) et des images Landsat7 ETM+ (3 images, résolution 30 m, offrant une gamme spectrale plus étendue que les orthophotographies). Ce type de données est particulièrement adapté à une cartographie fine des types d'occupation des sols, et en particulier des zones d'érosion (Metternicht et Fermont, 1998 ; Begueria, 2006 ; Vrieling *et al.*, 2007 ; Torkashvand, 2010). Le développement d'une méthode de cartographie des zones en érosion à partir de telles sources de données reste toutefois un challenge méthodologique à cette échelle.
- 18 Nous avons ainsi sélectionné aléatoirement 30 dalles d'orthophotographies infrarouges pour constituer un jeu de données d'entraînement du modèle de classification des zones en érosion. Ces dalles ont été automatiquement segmentées en objets de texture homogène puis classées manuellement en 2 catégories (érosion/pas d'érosion). La méthodologie proposée est une fusion (somme pondérée) de plusieurs méthodes de classifications supervisées des orthophotographies infrarouges et des images Landsat 7 ETM+. Trente autres dalles ont été sélectionnées aléatoirement pour constituer un jeu de

données de validation. Elles ont été segmentées et classées manuellement par photo-interprétation puis comparées aux différentes méthodes de classification ainsi qu'au modèle complexe proposé (en termes de sensibilité et spécificité). Les détails de cette analyse sont disponibles dans Bertrand (2014).

Intégration des facteurs de prédisposition

- 19 Les deux facteurs de prédisposition sont d'abord appréhendés à partir d'indicateurs simples pour évaluer le potentiel morphométrique et le potentiel sédimentaire des bassins versants puis sont ensuite combinés pour former des classes de susceptibilité morpho-sédimentaire. La probabilité morphométrique d'occurrence de laves torrentielles qui permet de traduire les conditions morphométriques efficaces est discrétisée en quatre classes de probabilité d'activité croissante (nulle $P \leq 0.02$, faible $0.02 \leq P \leq 0.5$, intermédiaire $0.5 \leq P \leq 0.75$, et forte $0.75 \leq P \leq 1$). Pour évaluer le potentiel sédimentaire, les surfaces en érosion sont cumulées dans les zones de déclenchement (petits bassins versants des tronçons de rangs inférieurs) puis cette superficie est rapportée à la surface totale du bassin versant. Si cette surface d'érosion active représente plus de 50 % de la zone concernée ou s'il existe des zones d'érosion de plus de 5 hectares dans le bassin versant, le potentiel est classé comme fort, et inversement, comme faible.
- 20 Dans les têtes de bassin versant, les classes de susceptibilité aux laves torrentielles sont définies en combinant classes de probabilité morphométrique d'occurrence et classes de potentiel sédimentaire du bassin versant selon des règles de décision fondées sur des observations expertes de terrain, résumées dans la matrice suivante (Tableau 1).

Tableau 1. Règles de classification de la susceptibilité au déclenchement de laves torrentielles, intégrant le potentiel morphométrique et la disponibilité sédimentaire

		Probabilité d'activité de laves torrentielles dans les bassins versants de rangs inférieurs (potentiel morphométrique)			
		Nulle $P \leq 0.02$	Faible $0.02 \leq P \leq 0.5$	Intermédiaire $0.5 \leq P \leq 0.75$	Forte $0.75 \leq P \leq 1$
Susceptibilité aux laves torrentielles dans les bassins versants de rangs inférieurs (potentiel sédimentaire)	Faible	Nulle	Faible	Faible	Intermédiaire
	Forte	Nulle	Intermédiaire	Forte	Forte

- 21 Plus en aval sur le réseau hydrographique, les classes de susceptibilité aux laves torrentielles sont définies pour chacun des tronçons à pente uniforme selon des règles de décision fondées sur des observations expertes de terrain, résumées dans la matrice suivante (Tableau 2). Pour un tronçon donné, la susceptibilité aux laves torrentielles résulte de l'ajustement de la classe de probabilité morphométrique d'occurrence de laves torrentielles en fonction des conditions de susceptibilité des biefs situés juste en amont. Cet ajustement se répercute récursivement de proche en proche, de l'amont vers l'aval.

Tableau 2. Règles de classification de la susceptibilité à la propagation de laves torrentielles, intégrant le potentiel morphométrique et la disponibilité sédimentaire, dans la dimension longitudinale

		Probabilité d'activité de laves torrentielles dans les bassins versants de rangs inférieurs (potentiel morphométrique)			
		Nulle $P \leq 0.02$	Faible $0.02 \leq P \leq 0.5$	Intermédiaire $0.5 \leq P \leq 0.75$	Forte $0.75 \leq P \leq 1$
Susceptibilité aux laves torrentielles des tronçons situés juste en amont (intégrant les deux facteurs de prédisposition)	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle
	Faible	Nulle	Nulle	Faible	Faible
	Intermédiaire	Nulle	Faible	Intermédiaire	Intermédiaire
	Forte	Nulle	Faible	Intermédiaire	Forte

Susceptibilité aux laves torrentielles dans les Alpes du Sud

Application du modèle statistique

- 22 L'extraction des indicateurs morphométriques a été réalisée sous ArcGIS™ à partir du réseau hydrographique digitalisé (d'abord corrigé topologiquement à la main) et du modèle numérique de terrain (MNT) à 25 m de l'IGN (BD TOPO©). Pour chaque tronçon du réseau hydrographique (qu'il soit en tête de bassin ou non), nous avons alors calculé la pente (degrés) de sa partie aval (correspondant potentiellement à une zone de dépôt), la différence entre l'altitude maximale de son bassin versant et l'altitude de son exutoire (m), et sa surface drainée (km²). Ces variables ont permis de calculer l'indice de Melton et la pente à l'exutoire, nécessaires pour prédire la probabilité morphométrique d'occurrence des laves torrentielles.

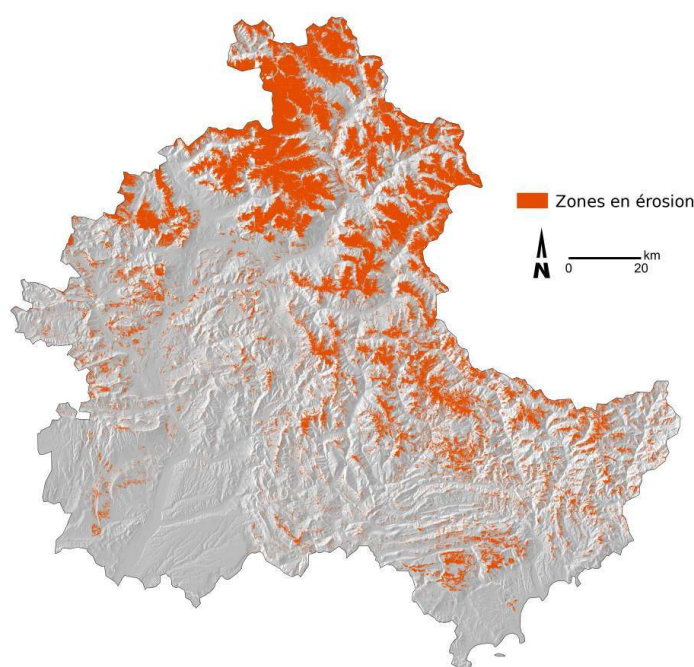
Cartographie automatisée de l'érosion dans les zones de déclenchement

- 23 L'approche par télédétection a permis d'établir une classification des zones en érosion dont la sensibilité, la spécificité et la précision générale du modèle, calculées pour les 30 dalles du jeu de données de validation (plusieurs centaines de millions de polygones classés) présentent des scores respectifs de 0.81, 0.94 et 0.90 (Bertrand, 2014). Une validation experte a également été réalisée à partir de 500 points distribués aléatoirement dans le bassin versant de la Bléone. Celle-ci enregistre des scores assez proches (0.74, 0.99 et 0.96) (Liébault *et al.*, 2015). Cette validation ne préjuge pas de la capacité du modèle de classification à bien délimiter spatialement les zones d'érosion mais permet de confirmer

que pour un pixel sélectionné de manière aléatoire le modèle est capable de bien déterminer s'il est inclus dans une zone d'érosion.

- 24 Ces deux types de validation indiquent que certaines zones d'érosion ne sont pas détectées par le modèle. Ces zones sont préférentiellement situées dans des affleurements de marnes noires recouverts d'une végétation clairsemée, ou dans des zones masquées (ombres dues au relief). La carte des zones en érosion obtenue à partir de la méthodologie décrite précédemment est présentée en Figure 3.

Figure 3. Carte des zones en érosion établie à partir du traitement des orthophotographies infrarouges et des images Landsat 7 ETM+



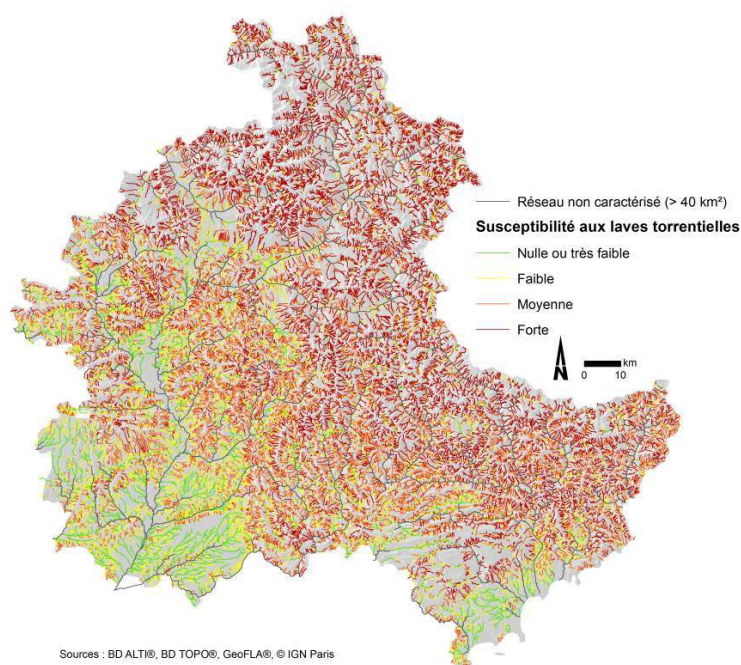
Sources : BD ORTHO IRC® (2009), BD ALTI®, © IGN Paris; Landsat ETM+ (2001-2003)

Bertrand, 2014.

Susceptibilité aux laves torrentielles intégrant les deux facteurs de prédisposition

- 25 Ces deux matrices ont permis de définir la susceptibilité de tous les tronçons du réseau hydrographique dont la taille de bassin versant n'excédait pas 40 km². La carte suivante (Figure 4) présente la susceptibilité aux laves torrentielles dans les zones de déclenchement et les tronçons aval de propagation (intégration des facteurs de prédisposition selon le Tableau 1 et de la continuité longitudinale de l'énergie gravitaire critique selon le Tableau 2).

Figure 4. Cartographie de la susceptibilité au déclenchement et à la propagation de laves torrentielles

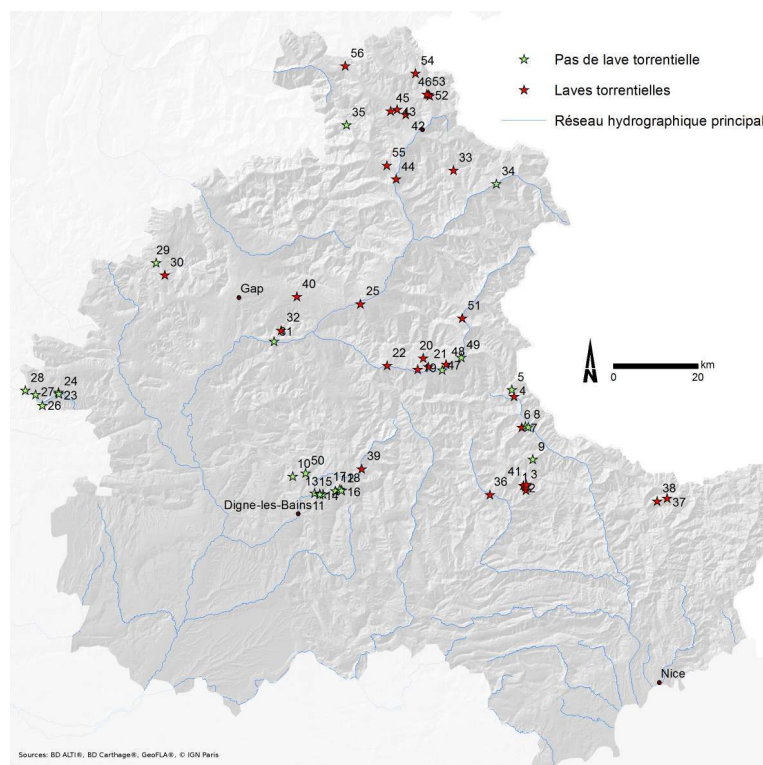


Bertrand, 2014.

Validation de la susceptibilité aux laves torrentielles et présentation des cartes

- 26 Ces classes de susceptibilité ont été validées sur la base d'un jeu de 56 sites d'observation (Figure 5) classés selon les processus rencontrés (31 torrents à lave et 25 torrents à charriage). Ces observations montrent que la méthodologie mise en place est fiable et robuste. La sensibilité, la spécificité, et la précision globale atteignent ainsi respectivement des scores de 0.71, 0.92 et 0.80, confirmant la capacité prédictive de la démarche.

Figure 5. Distribution spatiale des 56 sites utilisés pour l'évaluation de la carte de susceptibilité aux laves torrentielles ; ces sites sont très bien connus des experts soit parce qu'ils ont fait l'objet d'études spécifiques, soit parce qu'ils ont produit récemment des laves torrentielles bien documentées



- 27 La carte statique de susceptibilité présentée dans cet article est consultable sur une plateforme web de services déployée dans le cadre du projet RhyTMME (<http://rhytmme.irstea.fr/>). Ce projet repose sur l'implantation de radars de nouvelle génération dans les Alpes du Sud dans le but de mieux couvrir les zones de montagne : ces radars météorologiques (bande X) permettent de localiser, de mesurer les intensités des précipitations en temps réel et d'identifier le type de précipitations (Westrelin *et al.*, 2012). Ce projet a pour but de constituer, à terme, une plateforme d'avertissement des aléas naturels liés aux précipitations, afin de permettre aux acteurs locaux d'anticiper les événements dangereux et de mieux prendre en compte les risques montagnards. La plateforme RhyTMME permet à ce jour la superposition de la carte de susceptibilité aux laves torrentielles avec les cumuls de pluies ou les cartes de qualification de l'aléa pluviométrique pour plusieurs durées (de moins d'une heure à plusieurs semaines) afin d'identifier les secteurs présentant les classes de susceptibilité les plus fortes correspondant aux secteurs où l'aléa pluviométrique est le plus fort et ainsi de proposer des cartes d'aide à la décision en matière de gestion du risque torrentiel (mise en pré-alerte, cartographie des infrastructures exposées aux phénomènes torrentiels). Comme l'activité de laves peut être aggravée par celle de glissements de terrain évoluant sur les versants qui les bordent ou dans les bassins amont, la plateforme propose également de superposer à la carte de la susceptibilité torrentielle celle de l'aléa « glissement de terrain » (Fouchier *et al.*, 2016).
- 28 La plateforme RhyTMME a connu une première phase expérimentale, où le nombre d'utilisateurs était restreint à 100, ceux-ci relevant d'une quarantaine de structures ou

services publics (communes ou communautés de communes, services RTM de l'ONF, Directions Départementales des Territoires, services de secours, syndicats de rivière, gestionnaires d'infrastructures (SNCF, EDF), conseils départementaux). Ces acteurs, plus proches de leur territoire, nous ont fourni des retours d'expérience précieux pour l'amélioration de la carte de susceptibilité.

Discussion et perspectives d'évolution

- 29 L'analyse de la qualité de l'information délivrée sur la plateforme RhyTMME en matière de susceptibilité torrentielle révèle que le réseau hydrographique est globalement bien classé. Néanmoins, le retour d'expérience réalisé à partir des événements survenus depuis la mise en ligne de la carte montre quelques cas de laves qui se sont propagées sur des tronçons de susceptibilité nulle à très faible, comme par exemple la lave du Riou Sec survenue en Haute Ubaye en juillet 2015, qui a coupé la RD125. Des cas du même type ont également été observés lors de l'étape d'évaluation de la carte (voir les scores énoncés dans la section validation), qui a mis en évidence un affichage trop optimiste de la susceptibilité (le score de spécificité est meilleur que celui de sensibilité). D'un point de vue pratique, cela signifie que certains tronçons classés en susceptibilité nulle et faible, voire moyenne, présentent une sous-estimation de l'aléa par rapport à la réalité physique du phénomène.
- 30 L'examen au cas par cas de chaque tronçon mal classé montre que l'origine du problème est très souvent d'ordre géomatique. Certaines erreurs sont dues à des valeurs aberrantes sur le MNT à 25 m, qui subsistent même après les étapes de prétraitement du MNT réalisées pour s'en affranchir. D'autres sont liées à l'incohérence de la superposition du réseau hydrographique vectoriel avec le MNT. Le fait que le linéaire n'est pas toujours situé au point le plus bas dans le talweg (le linéaire passe sur une terrasse ou un versant) conduit à des erreurs dans l'évaluation des pentes. Ceci est lié à une trop large résolution spatiale du MNT. Ceci conduit également à une mauvaise discrétisation du réseau hydrographique en tronçons homogènes. Ici, l'algorithme statistique de Hubert appliqué aux valeurs de pente des segments de 50 m a conduit à la formation de tronçons homogènes courts et présentant des pentes moyennes plus faibles que celles qu'ils auraient enregistrés s'ils avaient agrégé plus de segments unitaires de 50 m. Ces tronçons courts, puisque situés dans des zones de confluence, où le relief est plus faible et le fond de vallée plus large, présentent donc une sous-estimation de l'aléa torrentiel. Au-delà du manque de précision des données du MNT utilisé, c'est également la sensibilité de ce test statistique qui est en jeu. Une amélioration des paramètres de ce test permettrait d'éviter les quelques problèmes de sur-segmentation du réseau hydrographique.
- 31 Un MNT à 5 m produit par interférométrie radar est aujourd'hui disponible sur l'ensemble du territoire et offre donc la possibilité de relancer une analyse spatiale des tronçons. Son utilisation conduirait à une meilleure évaluation des pentes, permettant de s'affranchir d'un certain nombre de problèmes tels que ceux mentionnés dans le paragraphe précédent. Pour la délimitation automatique des bassins versants, son utilisation dans une zone restreinte des Alpes-Maritimes a confirmé une amélioration nette des performances par rapport au MNT à 25 m de l'IGN (Bertrand 2014).
- 32 Une autre piste d'amélioration de l'évaluation de la susceptibilité aux laves torrentielles consisterait à mettre à jour régulièrement la cartographie des zones en érosion afin d'évaluer de manière dynamique l'état de surface de ces zones, donnant une indication

indirecte de la recharge sédimentaire des lits à forte pente. Cette étape de cartographie, déjà automatisée, pourrait être appliquée à des images satellites Pléiades, présentant les mêmes caractéristiques que les orthophotos tant en termes de résolution spatiale (50 cm après rééchantillonnage), que de couverture spectrale dans le visible et le proche-infrarouge. Ces images offrent de plus une résolution temporelle très fine, la couverture étant remise à jour chaque jour, ce qui permettrait de caractériser la recharge sédimentaire après des événements de forte intensité.

- 33 L'amélioration de l'évaluation régionale de la susceptibilité torrentielle doit également passer par la poursuite des retours d'expérience, qui sont toujours très riches d'enseignement sur la réalité des phénomènes torrentiels. Il apparaît en effet souhaitable d'enrichir notre jeu de données de validation, dont la taille reste relativement modérée par rapport au linéaire hydrographique caractérisé. Une autre piste intéressante à explorer pour améliorer l'évaluation de l'effet des conditions de recharge sédimentaire dans les bassins de tête serait d'effectuer une analyse systématique des réponses torrentielles survenues dans les têtes de bassins impactées par des pluies convectives de forte intensité. La distribution spatiale de ces pluies peut aujourd'hui être reconstituée à partir d'une rétro-analyse des données des radars RhyTMME, et confrontée à une analyse terrain des réponses torrentielles récentes. Ce type d'étude, qui n'était pas envisageable avant la mise en place des radars, est aujourd'hui possible et elle semble prometteuse non seulement pour la construction de proxys de recharge sédimentaire, mais aussi pour la détermination des pluies critiques de déclenchement des phénomènes (Marra *et al.*, 2014).
- 34 Pour passer d'une carte statique de susceptibilité aux laves torrentielles à une carte d'aléa, l'intégration des forçages météorologiques est nécessaire. Les conditions de pluie critiques permettant le déclenchement de laves torrentielles ont été mises en évidence à l'aide d'un seuil basé sur des données d'intensité et de durée des précipitations, mesurées sur un torrent actif des Alpes-Maritimes (le Réal) (Bel *et al.*, 2016). L'implémentation de ce seuil sur les données temps réel des radars météorologiques RhyTMME et son intégration avec la carte statique de susceptibilité permettrait de rendre dynamique la prédiction de l'aléa torrentiel.

BIBLIOGRAPHIE

Bertrand M., 2014.- Approches régionales de la susceptibilité torrentielle dans les Alpes du Sud. Ecole Normale Supérieure de Lyon, 162 p.

Bertrand M., Liébault F., Piégay H., 2013.- « Debris-flow susceptibility of upland catchments ». *Natural Hazards*, Vol. 67, pp. 497-511.

Begueria S., 2006.- « Identifying erosion areas at basin scale using remote sensing data and GIS: A case study in a geologically complex mountain basin in the Spanish Pyrenees ». *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, pp. 4585-4598.

Bel C., Liébault F., Bellot H., Fontaine F., Navratil O., Eckert N., Laigle D., 2016.- « Rainfall control of debris-flow triggering in the Réal Torrent, Southern French Prealps ». *Geomorphology*, Sous

presse, Epreuves corrigées. En ligne depuis le 7 Avril 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.004>

Bonnet-Staub I., 1998.– *Mécanismes d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes françaises. Contribution à la maîtrise du risque*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 391 p.

Cenderelli D. A., Kite J. S., 1998.– « Geomorphic effects of large debris flows on channel morphology at North Fork Mountain, eastern West Virginia, USA ». *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 23, pp. 1-19.

Chambon G., Laigle D., 2013.– « Les laves torrentielles », in Recking A., Richard D., Degoutte G. (dir.), *Torrents et rivières de montagne : Dynamique et aménagement*. Quae, Versailles, pp. 200-266.

Coussot P., Meunier M., 1997.– « Les laves torrentielles », in Ildefonse B., Allain C., Cossot P. (dir.), *Des grands écoulements naturels à la dynamique du tas de sable: Introduction aux suspensions en géologie et en physique*. Cemagref Editions, Anthony (France), pp. 71-88.

Fouchier C., Mériaux P., Atger F., Ecrepont S., Liébault F., Bertrand M., Bel C., Batista D., Azemard P., Saint-Martin C., & Javelle P., 2016.– *The RHYTMME system: an operational real-time warning and mapping system for flash floods, debris flows, landslide and rock falls in Southeastern France*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 18, EGU2016-13269, EGU General Assembly, Vienne, Autriche.

Horton P., Jaboyedoff M., Bardou E., 2008.– *Debris flow susceptibility mapping at a regional scale*. Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards, Université Laval, Québec, Canada.

Jackson L.E., Kostaschuk R.A., MacDonald G.M., 1987.– « Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains ». *Reviews in Engineering Geology*, Vol. 7, pp. 115-124.

Jakob M., Hungr O., 2005.– *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 720 p.

Kappes M.S., Malet J-P., Remaître A., Horton P., Jaboyedoff M., Bell R., 2011.– « Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France ». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 627-641.

Kostaschuk R.A., MacDonald G.M., Putnam P. E., 1986.– « Depositional process and alluvial fan-drainage basin morphometric relationships near Banff, Alberta, Canada ». *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 11, pp. 471-484.

Laigle D., Hector A.F., Hübl J., Rickenmann D., 2006.– « Confrontation de la simulation numérique de l'étalement de laves torrentielles boueuses à des observations d'événements réels ». *La Houille Blanche*, n°6, pp. 105-112.

Lajournade C., Beaufrère C., Lalanne-Berdouticq G., Martignac F., 1998.– « La catastrophe de Biescas du 7 août 1996 ; analyse de la crue torrentielle du rio Aras dans les Pyrénées aragonaises (Espagne) ». *La Houille Blanche*, n°5-6, pp. 128-137.

Liébault F., Remaître A., Peteuil, C., 2013.– « Géomorphologie des rivières de montagne », in Recking A., Richard D., Degoutte G. (dir.), *Torrents et rivières de montagne : Dynamique et aménagement*. Quae, Versailles, pp. 15-89.

Liébault F., Bertrand M., Piégay H., 2015.– « Automatic erosion detection in mountain basins: applications to the Bléone River basin », in *Guidelines for Assessing Sediment Dynamics in Alpine Basins and Channel Reaches*, Final WP4 report of the Alpine Space SedAlp Project, pp. 47-54.

Mathys N., Brochot S., Meunier M., 1996. – « L'érosion des Terres Noires dans les Alpes du sud : contribution à l'estimation des valeurs annuelles moyennes (bassins versants expérimentaux de Draix, Alpes de Haute Provence, France) / Erosion of the Terres Noires (Black Earth) in the

Southern French Alps : A contribution to an assessment of mean annual values (Draix experimental catchment areas) ». *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, Vol. 84, pp. 17-27.

Metternicht G.I., Fermont A., 1998.- « Estimating Erosion Surface Features by Linear Mixture Modeling ». *Remote Sensing of Environment*, Vol. 64, pp. 254-265.

Miller D.J., Burnett K.M., 2008.- « A probabilistic model of debris-flow delivery to stream channels, demonstrated for the Coast Range of Oregon, USA ». *Geomorphology*, Vol. 94, pp. 184-205.

Marchi L., Brochot S., 2000.- « Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises, morphométrie et processus de transport solide torrentiel ». *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, Vol n°88-3, pp. 23-38.

Marchi L., Pasuto A., Tecca P.R., 1993.- « Flow processes on alluvial fans in the Eastern Italian Alps ». *Zeitschrift für Geomorphologie*, Vol. 37, pp. 447-458.

Marra F., Nikolopoulos E.I., Creutin J.D., Borga M., 2014.- « Radar rainfall estimation for the identification of debris-flow occurrence thresholds ». *Journal of Hydrology*, Vol. 519, pp. 1607-1619.

Remaître A., Malet J.-P., Maquaire O., Ancey C., Locat J., 2005.- « Flow behaviour and runout modelling of a complex debris flow in a clay-shale basin ». *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 30, pp.479-488.

Remaître A., Maquaire O., Pierre S., 2002.- « Analyse d'une lave torrentielle dans le torrent de Faucon (bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence), détermination des zones de déclenchement et de contribution ». *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, Vol. 1, pp. 71-84.

Torkashvand A.M., 2010.- « The possibility in providing soil surface erosion map by the supervised classification of ETM+ satellite images in a mountainous basin (Roodbar sub-basin, Guilan, Iran) ». *Scientific Research and Essays*, Vol. 5, pp. 343-348.

Toyos G., Dorta D.O., Oppenheimer C., Pareschi M.T., Sulpizio R., Zanchetta G., 2007.- « GIS-assisted modelling for debris flow hazard assessment based on the events of May 1998 in the area of Sarno, Southern Italy: Part I. Maximum run-out ». *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 32, pp. 1491-1502.

Vrieling A., Rodrigues S.C., Bartholomeus H., Sterk G., 2007.- « Automatic identification of erosion gullies with ASTER imagery in the Brazilian Cerrados. » *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, pp. 2723-2738.

Wieczorek G.F., Glade T., 2005.- « Climatic factors influencing occurrence of debris flows », in Jakob M., Hungr O. (dir), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, Berlin, pp. 325-362.

Westrelin S., Mériaux P., Tabary P., Aubert Y., 2012.- *Hydrometeorological risks in Mediterranean mountainous areas, RHYTMME Project: risk management based on a radar network*, Proceedings of the 7th International Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Toulouse, France, 6 p.

RÉSUMÉS

Cet article décrit une méthodologie régionale d'identification des torrents susceptibles d'initier et de propager des laves torrentielles. La mise en œuvre de cette démarche d'évaluation, mobilisant des méthodes statistiques et géomatiques a permis de distinguer sur le territoire des Alpes du Sud les bassins versants inférieurs à 40 km² en fonction de leur aptitude à former des

laves torrentielles sous l'effet des forçages hydrométéorologiques, sur la base de critères morphométriques (indice de Melton et pente locale) et de fourniture sédimentaire (zones en érosion active des têtes de bassin). Cette méthodologie a été validée sur une cinquantaine de sites avec de très bons scores (les réponses torrentielles de 80 % des bassins versants ont été correctement prédites). Cette carte de susceptibilité aux laves torrentielles a été intégrée à la plateforme hydrométéorologique de services du projet RhyTMME. Celle-ci affiche également en temps réel la distribution spatiale des pluies issues des données radar, permettant ainsi à terme l'affichage en temps réel de la probabilité d'occurrence de laves sur le réseau.

This article describes a regional methodology of debris-flow susceptibility mapping. The implementation of this approach is based on statistical and GIS methods and makes it possible to identify catchments in the Southern French Alps, according to their morphometric (Melton index and local slope) and sediment supply conditions (active erosion zones in headwater catchments), that are prone to debris flows because of hydrometeorological forcing. This methodology has been validated on 50 sites with very high scores; the geomorphic response was correctly predicted for 80% of the sites. The map of susceptibility to the occurrence of debris flow has been integrated into the RhyTMME project's Web platform. This platform also offers a visualisation of the rainfall's spatial distribution (from meteorological radar data), enabling automatic real-time detection of the triggering of debris flow at the regional scale.

INDEX

Keywords : susceptibility, debris-flow, Southern French Alps, GIS, remote sensing

Mots-clés : susceptibilité aux laves torrentielles, Alpes du Sud, géomatique, télédétection

AUTEURS

MÉLANIE BERTRAND

Université Grenoble Alpes, Irstea, UR ETGR, 2 rue de la Papeterie-BP 76, F-38402 St-Martin-d'Hères, France

melanie.bertrand@irstea.fr

FRÉDÉRIC LIÉBAULT

Université Grenoble Alpes, Irstea, UR ETGR, 2 rue de la Papeterie-BP 76, F-38402 St-Martin-d'Hères, France

frederic.liebault@irstea.fr

HERVÉ PIÉGAY

UMR 5600 EVS, CNRS, Université de Lyon

herve.piegay@ens-lyon.fr